

# 交流モータのトルクリップル低減を目的とした 半径方向に可動するリニア振動アクチュエータ の特性解析

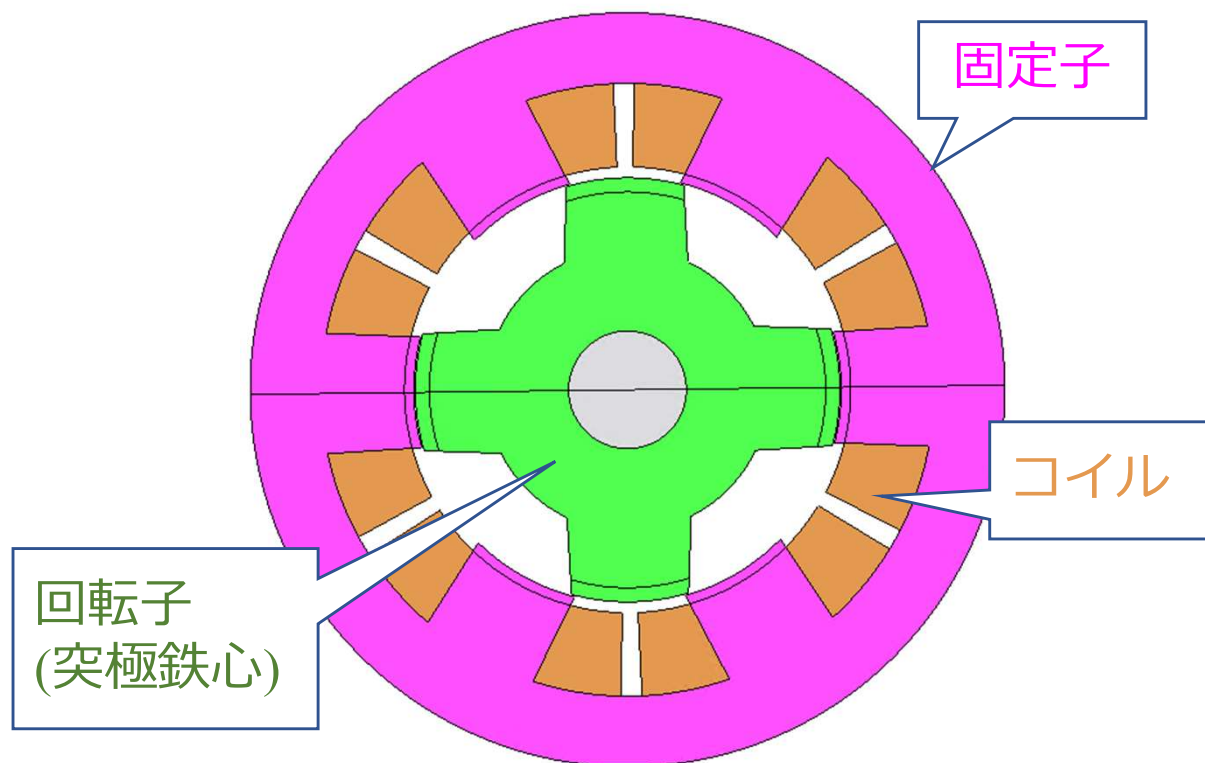
Performance Analysis of a Radially Moving Linear Oscillatory Actuator  
for Reducing Torque Ripple of AC Motors

©長沼 大樹、加藤 雅之（茨城大学）



- 研究背景・先行研究
- 研究目的
- 研究内容
- まとめと今後の展望

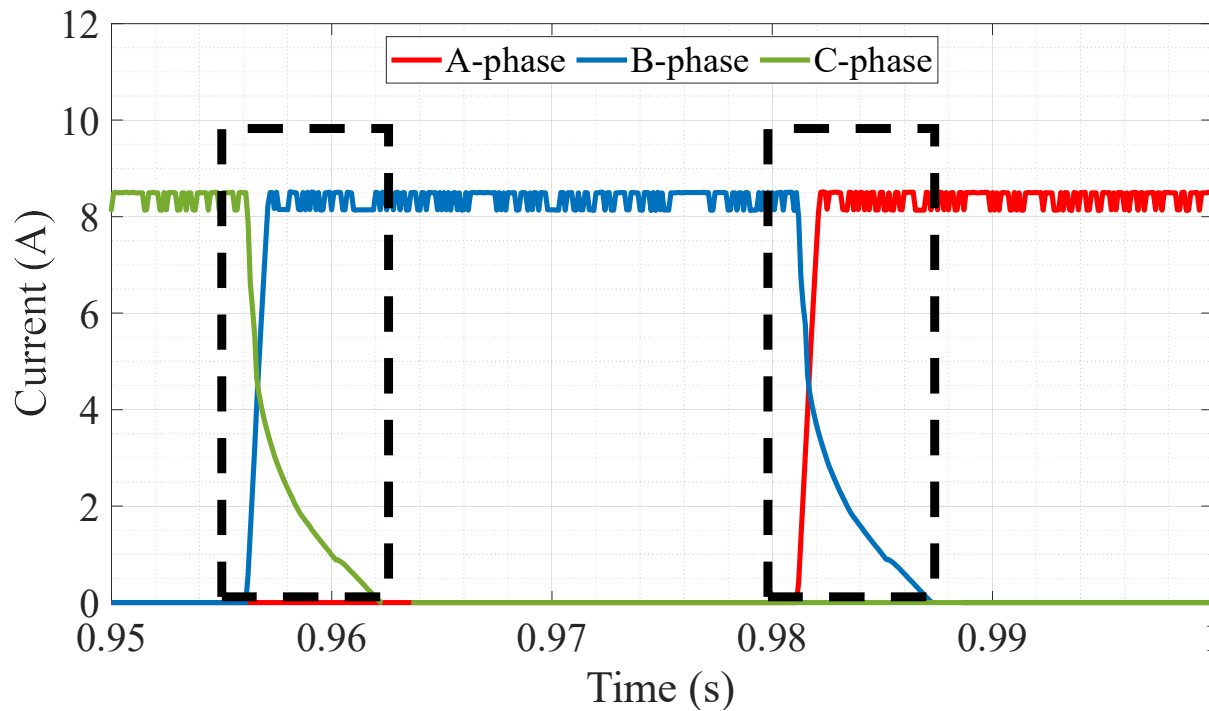
- スイッチトリラクタンスモータ（SRM）は磁気抵抗（リラクタンス）を利用するモータ



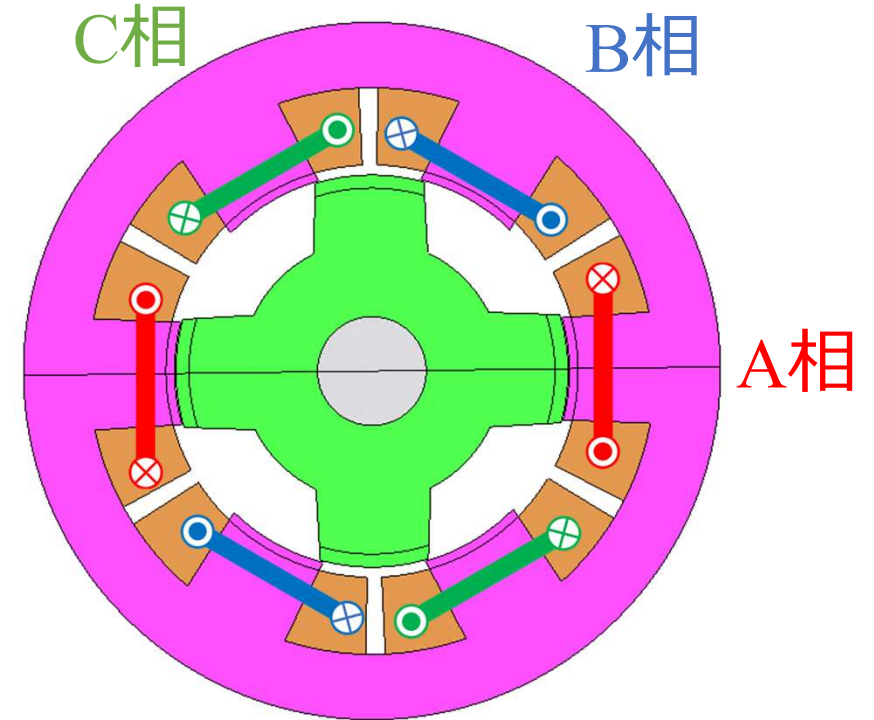
4極6スロットのSRM

回転子が磁石を用いない鉄心のみ構成であるため  
低コストな高出力モータとして期待されている

- SRMは一般的にパルス電流駆動法で駆動



パルス電流駆動時の電流波形



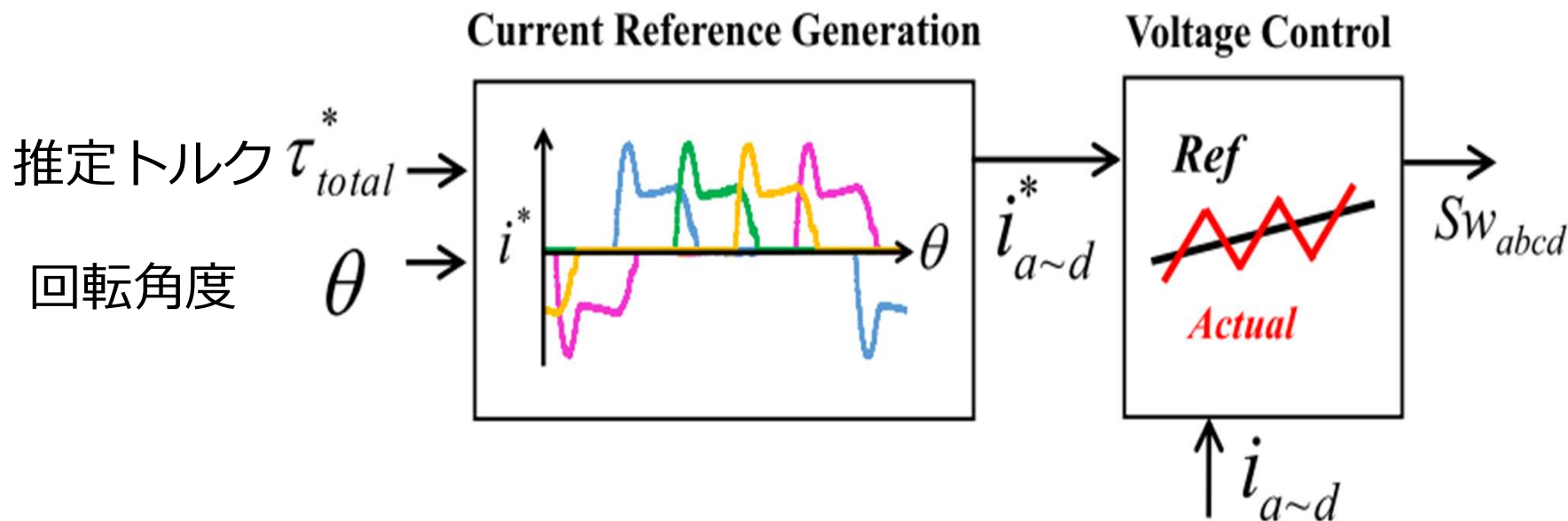
SRMの構造

通流相切り替え時の電流値が小さい  
→トルクリップル (脈動) が発生

SRMはトルクリップル(脈動), 騒音, 振動が大きい  
というデメリットを持つ

## 瞬時電流波形制御[1]

トルクが一定になるように瞬時電流波形を制御する方法

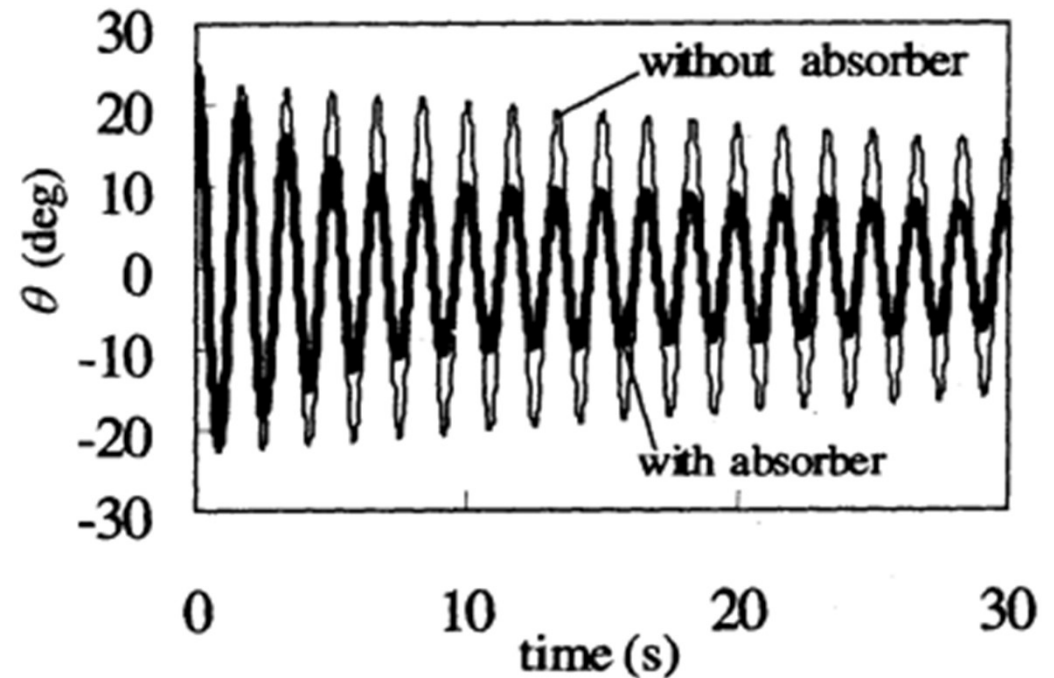
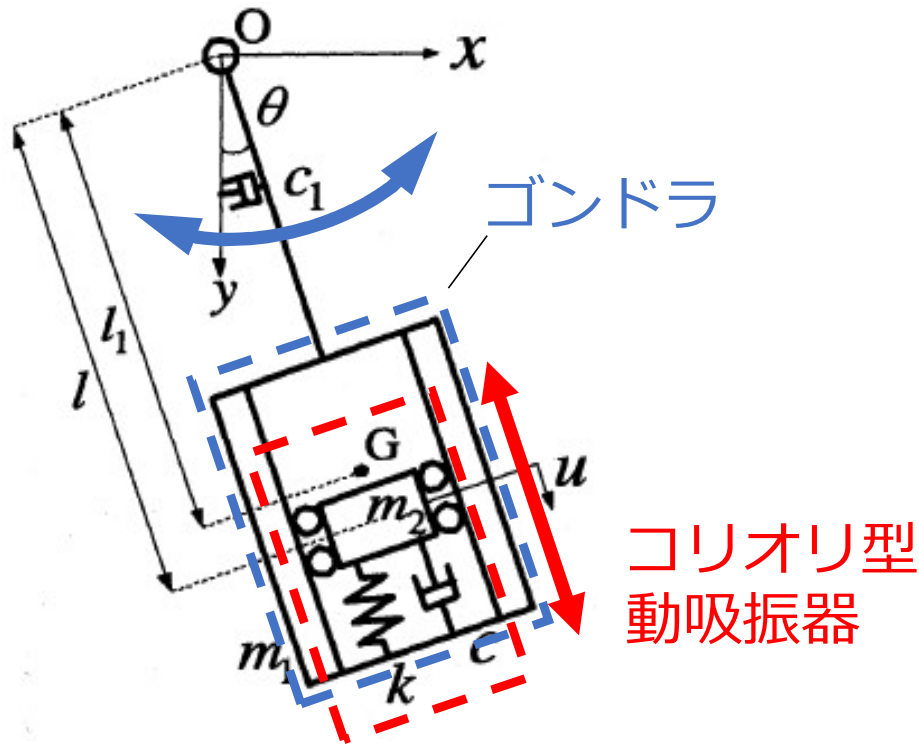


## 瞬時電流波形制御の構成

### 特徴

- SRMの構造変更が不要なため、既設のSRMに適用可能
- × 高精度な制御に複雑な制御ロジックの実装が必要

- コリオリカ（回転座標系で運動する物体に働く，運動方向と垂直な方向の慣性の力）を利用して，回転振動を減衰させるコリオリ型動吸振器に着目した



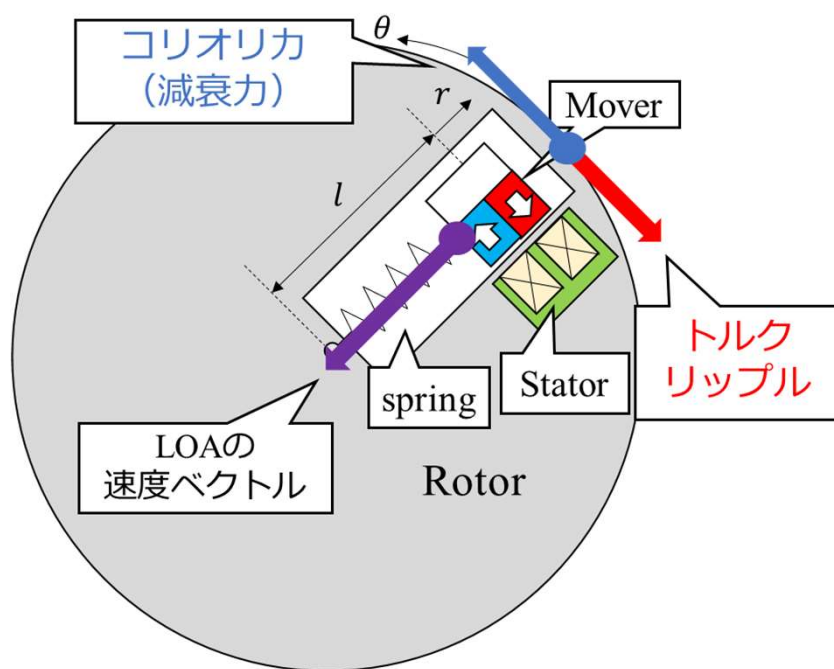
ゴンドラに設置されたコリオリ型動吸振器[2]

制振効果

○ 大きな振幅の回転振動を減衰可能

× コリオリカ(減衰力)をアクティブ制御できない

- コリオリカを利用して交流モータのトルクリップルをキャンセル
- リニア振動アクチュエータ(LOA)を用いることで、コリオリカ(減衰力)がアクティブ制御可能になると考えた



## LOAの特徴

- シンプルな構造, 高効率

## 応用例



## LOAを交流モータの回転子に配した構造

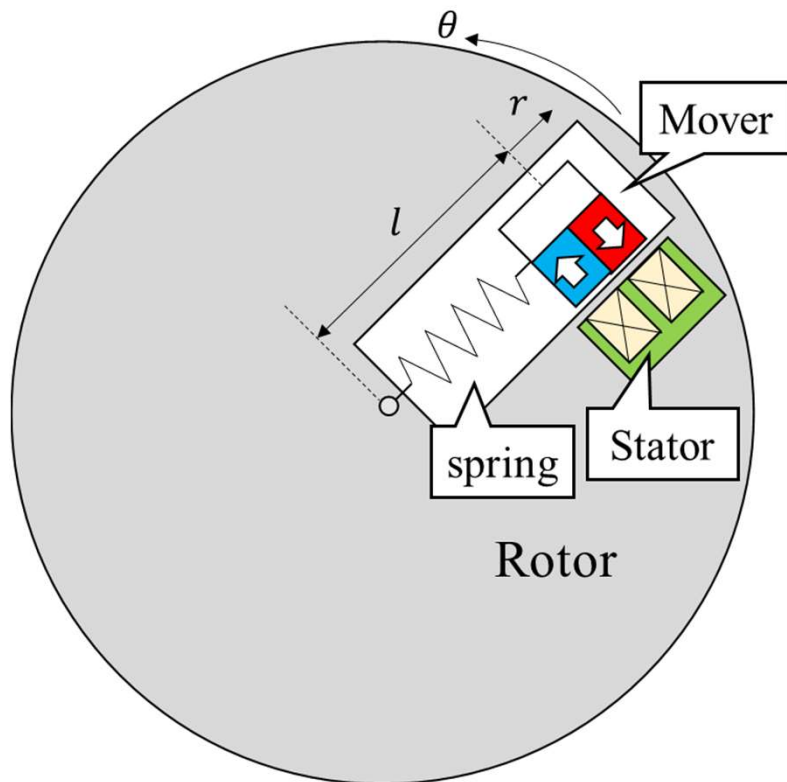
LOAを用いて交流モータ (本研究ではまずSRMを対象にする) のトルクリップル(脈動)を低減する

## SRMとLOAの連成構造

- SRMの回転子表面に, LOAを設置
- 回転子に伴って回転するLOAに電源供給を行う必要がある
- 本研究では, 回転子上のバッテリーによる電源供給を仮定

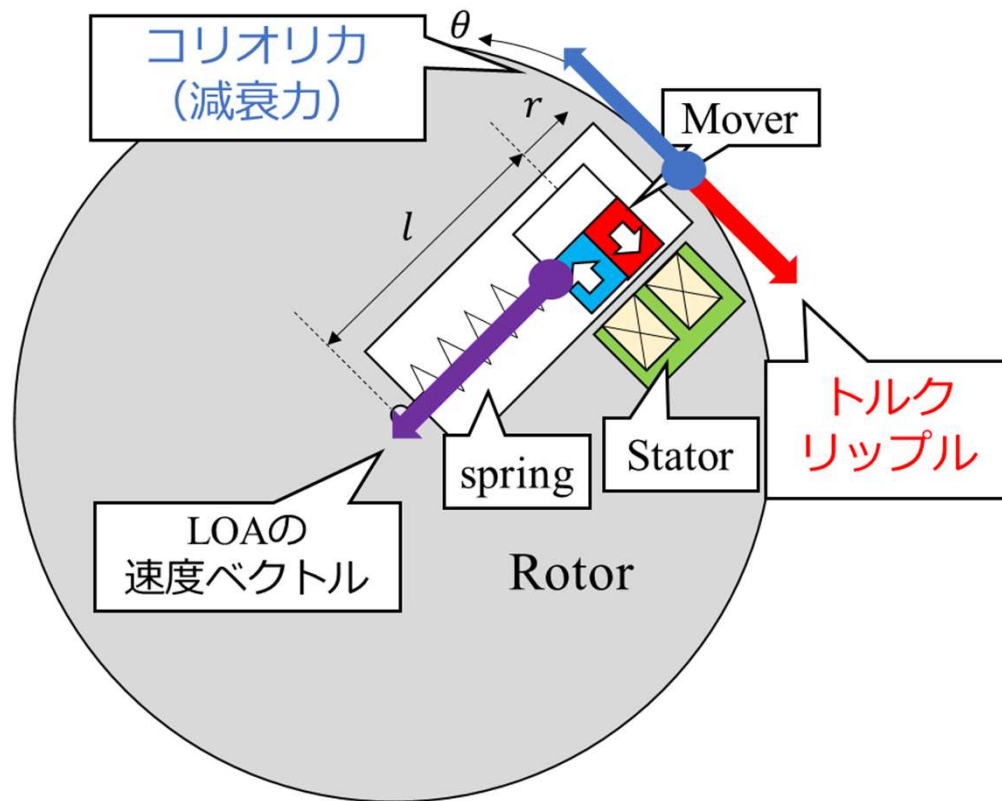
## 原理

- コイルを励磁することで半径方向に電磁力が発生し, 可動子が半径方向に振動する  
→円周方向にコリオリ力が発生
- ※コイルを励磁しないパッシブ動作でもコリオリ力は発生する





# LOAのパッシブ動作(遠心力でLOAが加振)



LOAの運動方程式(半径方向)

$$m\ddot{r} + k_r r + c_r \dot{r} = \underline{m(l+r)\dot{\theta}^2}$$

遠心力

遠心力によって受動的に振動

SRMの運動方程式(円周方向)

$$J\ddot{\theta} + m(l+r)^2 \ddot{\theta} + \underline{2m(l+r)\dot{r}\dot{\theta}} + c_\theta \dot{\theta} = \underline{T_e - T_{load}}$$

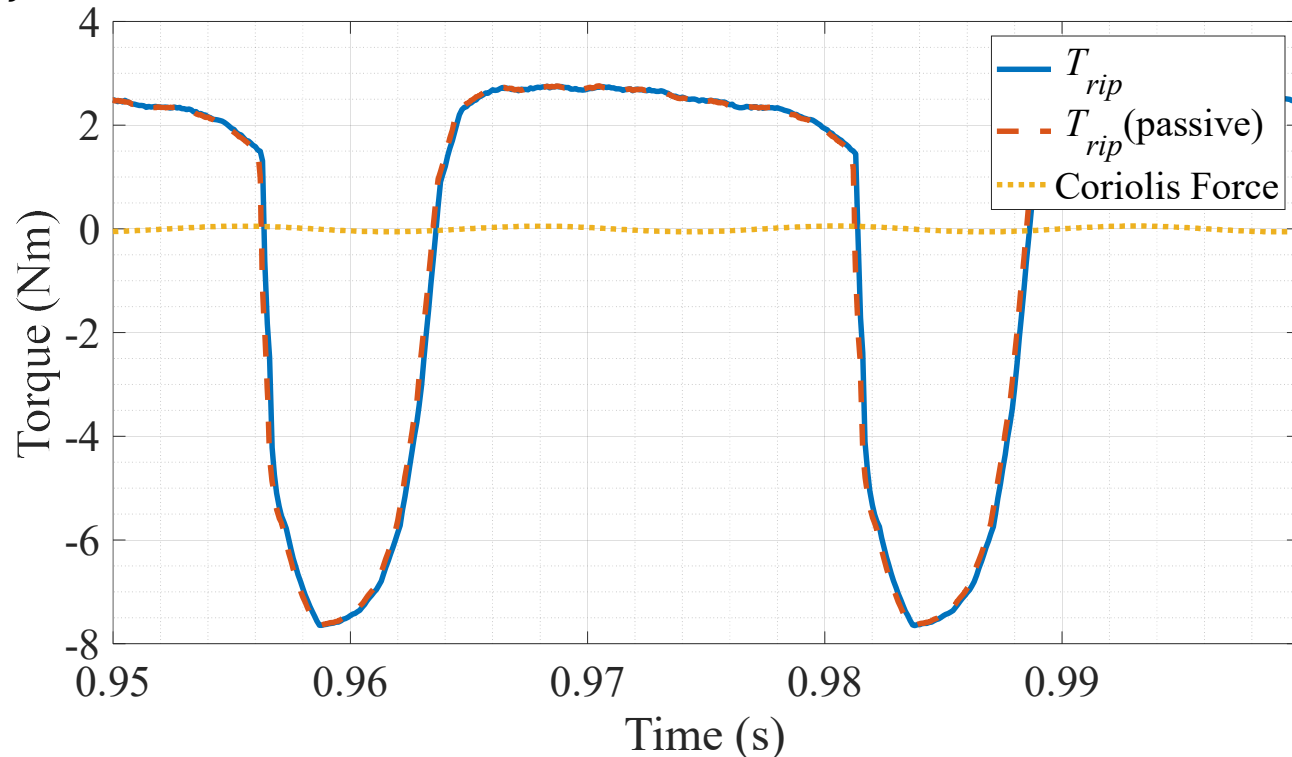
コリオリ力

トルクリップル

コリオリ力を利用してトルクリップルをキャンセル

LOAに電流を流さないパッシブ動作で, SRMのトルクリップルが低減されるか確認する

※目標速度 $\omega_{ref} = 200$  [rpm], 負荷トルク 10 [Nm]

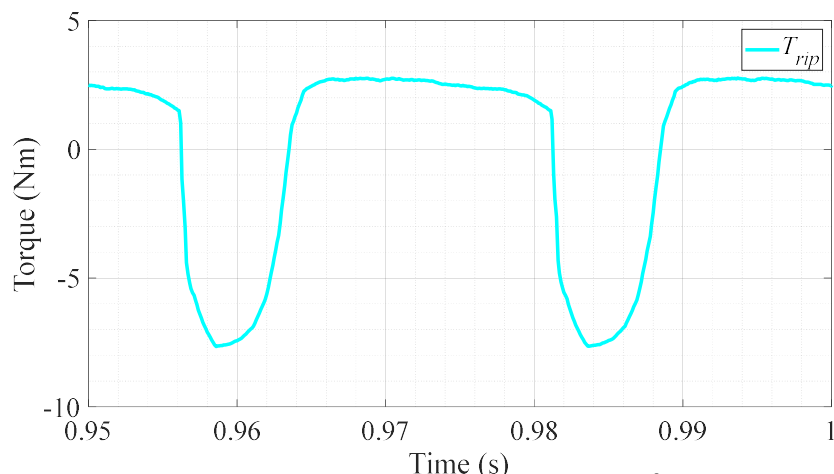


## パッシブ動作時のMATLAB/Simulinkシミュレーション結果

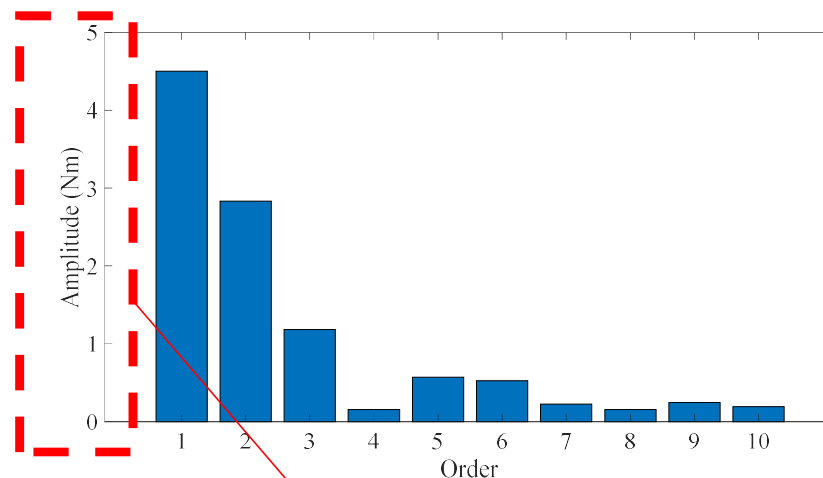
- SRMのトルクリップルと、パッシブ動作時のトルクリップルがほぼ一致
- SRMのトルクリップルと比較して、発生しているコリオリ力が小さい

パッシブ動作では、SRMのトルクリップルを低減できない

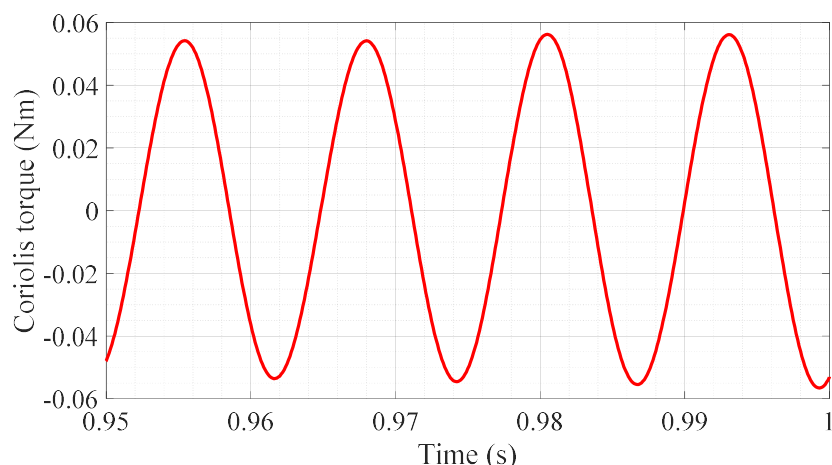
※目標速度 $\omega_{ref} = 200$  [rpm], 負荷トルク $T_{load} = 10$  [Nm]



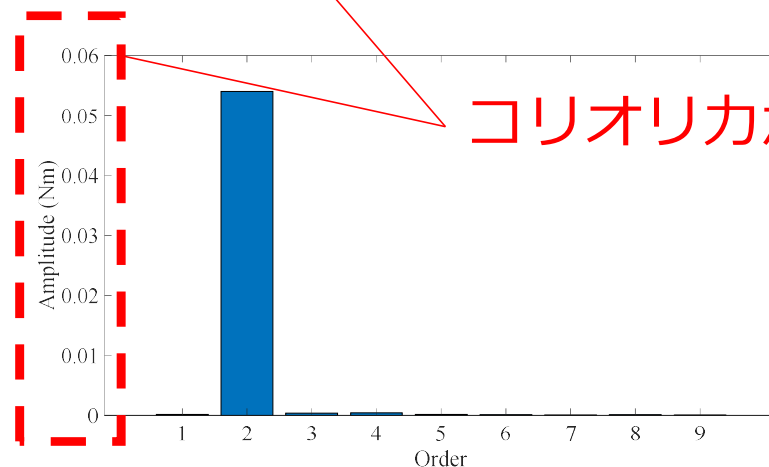
SRMのトルクリップル



SRMのトルクリップルFFT解析結果



パッシブ動作時のコリオリカ

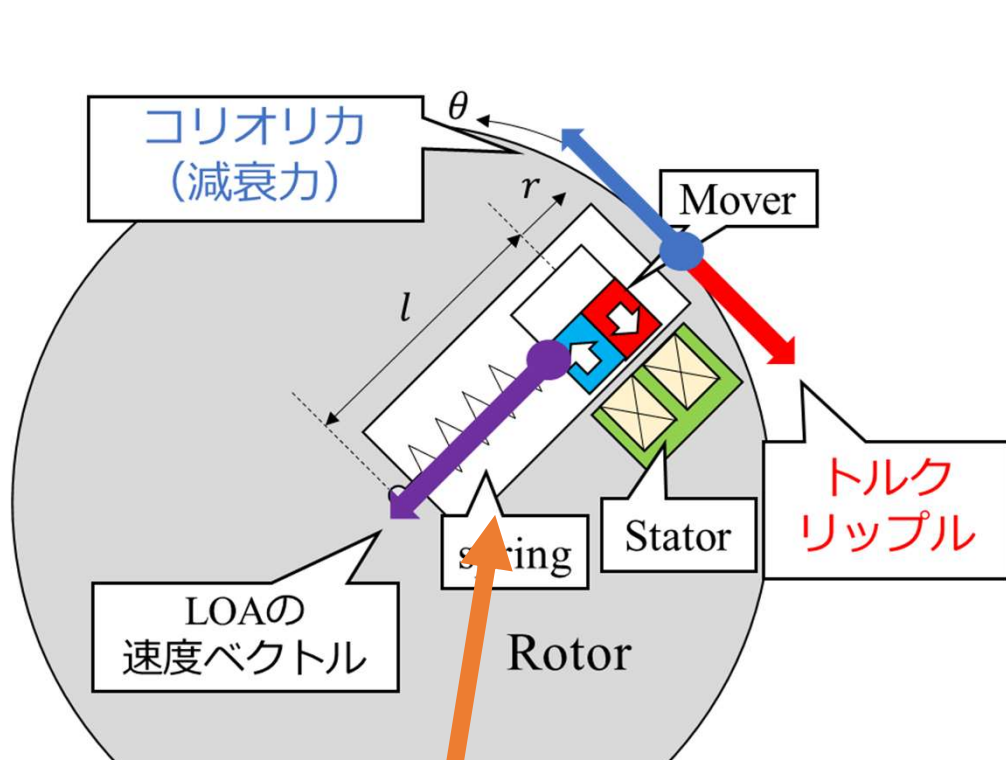


コリオリカのFFT解析結果

コリオリカが小さい

➤ トルクリップル低減には正弦波のコリオリカでは不十分

コリオリカ $2m(l+r)\dot{r}\dot{\theta}$ が非正弦波になるためには、可動子の振動変位 $r$ が非正弦波である必要があると考えられる



リニア振動アクチュエータ (LOA)

LOAの運動方程式（半径方向）

$$m\ddot{r} + k_r r + c_r \dot{r} = m(l+r)\dot{\theta}^2 + \underline{K_t I} + K_d r$$

LOA可動子の振動変位 $r$ が非正弦波になるように制御

SRMの運動方程式（円周方向）

$$J\ddot{\theta} + m(l+r)^2 \ddot{\theta} + \underline{2m(l+r)\dot{r}\dot{\theta}} + c_\theta \dot{\theta} = T_e - T_{load}$$

コリオリカ

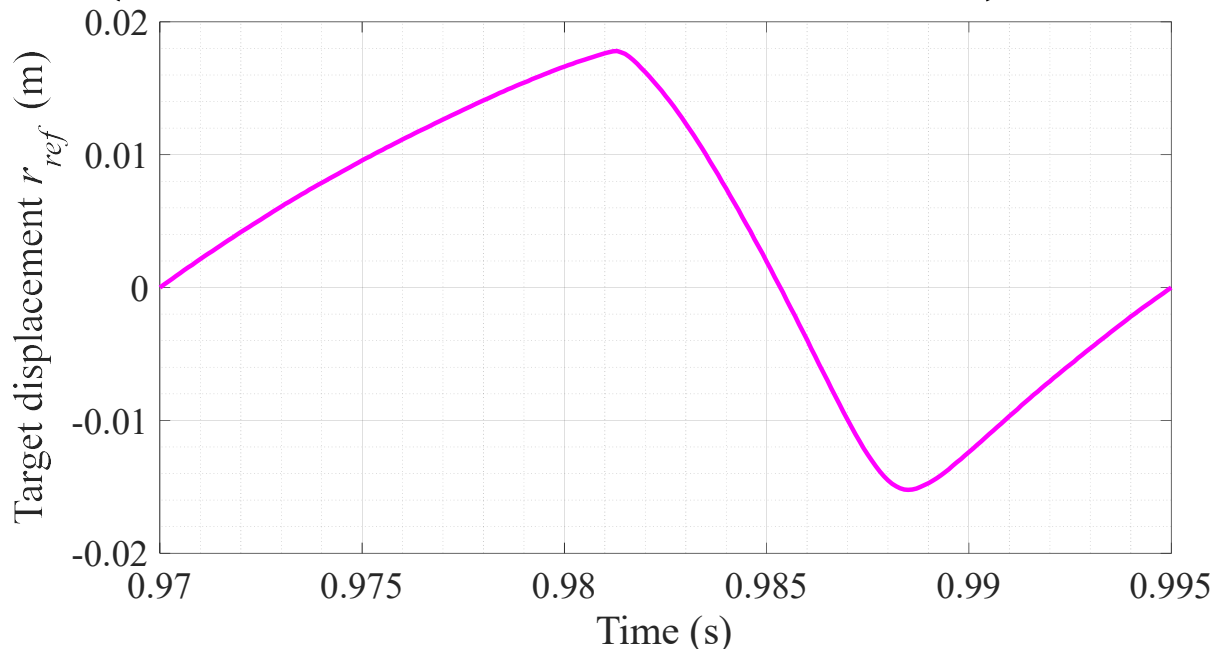
非正弦波のコリオリカによってトルクリップルをキャンセル

コリオリカを非正弦波にするために、LOAをアクティブ動作してLOA可動子変位 $r$ が非正弦波になるよう制御する

$$\frac{2m(l+r)\dot{r}\omega}{\text{コリオリカ}} = \eta T_{rip}$$

※トルクリップル低減率 $\eta = 0.5$ ,  
 目標速度 $\omega_{ref} = 200$  [rpm], 負荷トルク10 [Nm]

➔  $r_{ref}(t) = l \left( \sqrt{1 + \frac{\eta}{m l^2} \int_0^t F(\tau) d\tau} - 1 \right)$  ※ $F(t) = \frac{T_{rip}}{\omega}$  [Nms/rad]



要求されるLOA可動子の振動変位波形

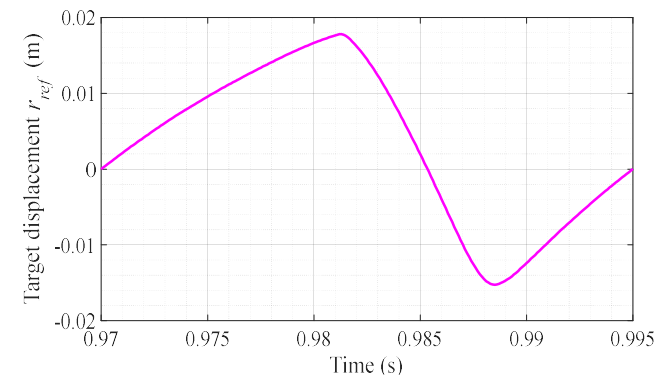
SRMのトルクリップル低減に求められるLOA可動子の振動変位を求めた

## SRMの運動方程式

$$J\ddot{\theta} + m(l+r)^2\ddot{\theta} + 2m(l+r)\dot{r}\dot{\theta} + c_{\theta}\dot{\theta} = T_e - T_{load}$$

## LOAの運動方程式

$$m\ddot{r} + k_r r + c_r \dot{r} = m(l+r)\dot{\theta}^2 + K_t I + K_d r$$

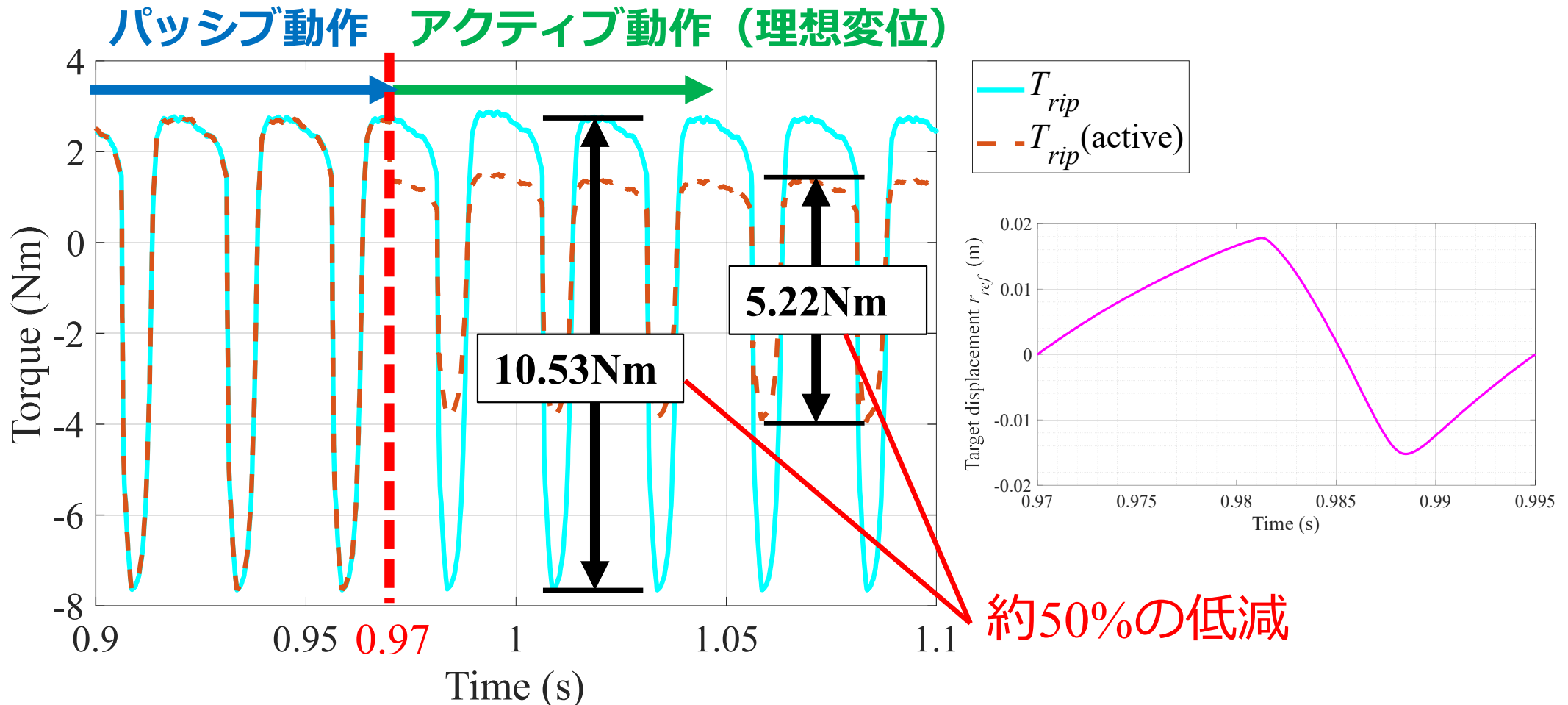
LOA可動子の理想変位 ( $\eta = 0.5$ )● 通常のシミュレーション

LOAの運動方程式から求められた $r, \dot{r}$ を, SRMの運動方程式に入力

● 算出した理想変位の正確性検証が目的のシミュレーション

算出したLOA可動子の理想変位を, SRMの運動方程式に入力してトルクリップルが低減されるか確認する

トルクリップル低減率 $\eta = 0.5$ , 算出した振動変位を0.97sから入力



算出したLOA可動子の理想変位を入力したシミュレーション結果

算出したLOA可動子の理想変位が入力されると, SRMのトルクリップルが約50%低減されることが確認された

## ● まとめ

- 交流モータのトルクリップル低減を目的として、半径方向に振動するLOAをモータの可動子に設置する手法を提案した
- LOAがパッシブな動作では、SRMのトルクリップルが低減されないことがわかった
- 50%のトルクリップル低減にLOA可動子が要求される非正弦波の振動変位波形を算出した
- シミュレーションにより、算出した理想振動変位での駆動が達成されれば、SRMのトルクリップルを50%低減できることがわかった

## ● 今後の展望

- 可動子が理想の振動波形になるような、LOAへの電圧印加方法の検討・開発
- 要求仕様決定されたLOAの構造検討・磁気回路設計・磁界解析による特性評価